基于 LUCC 和景观格局变化的广西山口红树林湿地动态研究

1. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心，海南 海口 571127

摘要：【目的】本研究在 2022 年广西山口国家级红树林生态自然保护区（以下简称山口红树林保护区）实地调查数据的基础上，结合 LUCC 和景观格局指数，选取 1987-2021 期间六个时期的遥感影像，利用面向对象的图像分类方法，着重探索广西山口红树林湿地变化过程和重要影响因素。【结果】从土地利用角度来看：研究区近 35 年间地类之间不断转换，其中耕地面积持续减少，米草滩和养殖坑塘大比例增长，米草滩主要侵占原沿海滩涂，养殖坑塘主要由林地和耕地转换而来；就景观角度来看：景观破碎度持续增加，连通性逐渐降低，景观形状逐渐变得复杂，地类演替变得频繁；Pearson 相关性分析表明，沿海滩涂、米草滩和养殖坑塘的土地利用变化与景观指数之间存在极显著或显著的相关性。【结论】在过去 35 年中，山口红树林保护区经历了重大的土地利用变化，入侵物种（米草滩）和人为干扰（养殖坑塘）是影响该地区红树林湿地变化的主要因素，也是景观破碎度持续增加的主要成因；研究采用多元方法，多角度分析，揭露区域影响因子的差异性，对典型红树林生态系统的环境管理和保护工作提供理论依据。

关键词：红树林湿地；LUCC；景观格局；人为干扰；物种入侵
中图分类号：X87　文献标识码：A

Mangrove Wetland Dynamics in Shankou, Guangxi based on LUCC and Landscape Pattern Change

1. Haikou Geological Survey of Marine Center, Haikou, Hainan 571127, China

Abstract: [Objective] Based on the field survey data of Guangxi Shankou National Mangrove Ecological Nature Reserve (hereinafter referred to as Shankou Mangrove Reserve) in 2022, this study selects remote sensing images of six periods from 1987 to 2021 by combining with LUCC and Landscape Pattern Index, and utilizes the object-oriented image classification methodology, which focuses on exploring the process of change of the mangrove wetland in Shankou, Guangxi, and the important influencing factors. [Results] From the perspective of land use: during the past 35 years in the study area, there has been a continuous conversion between land classes, in which the area of cultivated land has been continuously reduced, the area of rice-grass beaches and aquaculture pits have increased in large proportion, the rice-grass beaches have mainly encroached on the former coastal beaches, and the aquaculture pits have mainly been converted from forested land and cultivated land; from the perspective of the landscape: the degree of landscape fragmentation has been continuously increased, the connectivity has been reduced gradually, the shape of the landscape has gradually become more complex, and the land class succession has become more frequent. frequent; Pearson correlation analysis showed that there was a highly significant or significant correlation between land use change and landscape indices of coastal mudflat, mizuna mudflat and aquaculture ponds. [Conclusion] Over the past 35 years, the Yamaguchi Mangrove Reserve has experienced significant land use changes, and invasive species (mikusa beaches) and anthropogenic disturbances (aquaculture pits and ponds) are the main factors affecting the changes of mangrove wetlands in the area, and are also the main causes of the continuous increase in landscape fragmentation; the study adopts a multivariate approach and a multi-dimensional analysis to expose the variability of regional influencing factors, and provides theoretical bases for environmental management and conservation efforts in typical mangrove ecosystems. management

and protection of typical mangrove ecosystems by providing theoretical basis.

Key words: Mangrove wetland; LUCC; landscape pattern; anthropogenic disturbance; species invasion

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落，具有高效的生产力与丰富的生物多样性在生物多样性保护、应对全球气候变化等方面具有非常重要的作用，其作为海洋碳汇的重要组成部分，相比陆地生态系统具有更高的固碳效率与固碳能力，也是生态系统服务功能最强的生态系统之一(Cameron Clint et al., 2016; 张韫　等, 2022)；目前通过多时期遥感影像结合景观生态学，实现红树林多时期变化监测的方法，国内外已然非常成熟，在我国，如(郑晓敏　等, 2017; 韩淑梅　等, 2012; Junyao Zhang et al., 2021)对全国典型红树林湿地进行了深入研究，揭示其时空变化和景观格局；国外学者(Anh Ngoc Thi Do et al., 2022; J. Pastor-Guzman et al., 2018)分别结合人工神经网络和物候遥感，揭示红树林的动态变化；为求多维度研究红树林湿地，已有学者进一步融合 LUCC 指标；因其是景观格局发生时空变化的关键成因，它在很大程度上影响着景观配置的变化、区域生态功能等方面(Zhang YH et al., 2015)，可定量分析区域生态的敏感性、脆弱性、风险性及生态修复意见具有重要意义(A. Azizi et al., 2016)，如(吴庭天　等, 2022)使用此方法对海南东寨港红树林湿地进行了研究，但使用此类综合方法进行红树林湿地的专项研究相对较少。

广西北部湾区域属于半封闭海湾，涵盖多种景观类型，主要为滨海湿地，生境独特，随着北部湾经济区的发展，可能会威胁到广西北部湾红树林生态系统。山口红树林湿地，红树林相对矮小，密度较大，自然林为主，独具特征，入侵物种较为典型，其作为北部湾生态系统的重要组成部分，了解该地区红树林的动态变化趋势对保护这些生态系统至关重要，(张威　等, 2015)使用 1987-2016 年的遥感影像结合实地调查，对该地区红树林变化进行了深入研究；本研究基于地区资源更新和多维度方法的角度对广西山口红树林湿地进行探索分析，影像周期为 1987-2021 年间，方法为长序列多时期遥感遥感影像集成 LUCC 和景观格局指数，一是通过此方法分析山口红树林湿地近 35 年间的变化状况，对该地现有湿地资源变化的补充和更新，以期为广西山口地区生态环境保护及城乡建设和谐发展提供参考；二是证明两种相结合的方法对广西山口典型湿地区的适应性，探索典型红树林湿地区的变化状况和受干扰因素，揭示其演替规律，为丰富红树林湿地研究数据库。

1. 材料与方法

1.1　研究区域及数据获取

山口红树林保护区位于广西合浦县沙田半岛东西两侧（中心位置地理坐标 21°28′N，109°43′E）， 2002 年被收入国际重要湿地名录(韦江玲　等, 2019)；保护区为亚热带海洋季风气候，年平均气温为 23.4°C，最低气温为 2°C，最高气温为 37.4°C，年降水量在 1500-1700mm，4 月至 9 月降水最为集中，潮汐类型为不规则全日潮，平均潮差 2.35m，最大潮差 6.25m(余辰星　等, 2014)，保护区内有 9 科 10 种真红树和 5 科 6 种半红树(韦江玲　等, 2020)，建群种有红海榄(Rhizophorastylosa)、木榄（Bruguieragymnorrhiza)、桐花树（Aegicerascorniculatum)、白骨壤（Aricenniamarina）；互花米草呈单优群落生长或与红树林混生，其主要分布在丹兜海潮滩、英罗潮滩(李丽凤　等, 2021)。

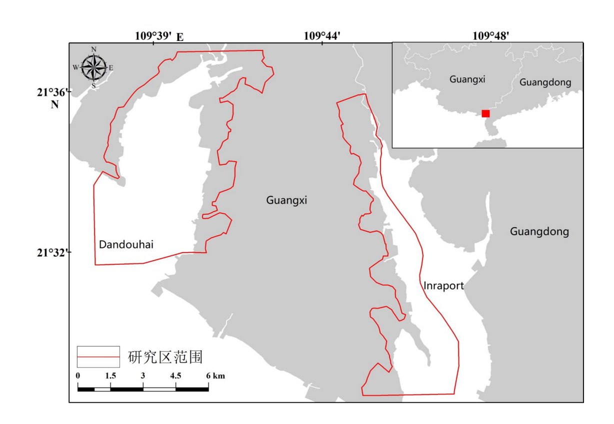


图 1 研究区地理位置

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作，图中红色线为本次研究区范围。

Fig. 1 Geographic location of the study are

遥感影像数据源为 Landsat 系列，分辨率为 15m\30m，景数均为一景（表 1）；因米草滩与红树林地较难精确区分，本研究从两个角度出发，首先，统一选取低潮位的影像，减少潮位变化对红树林和互花米草识别的影响。其次，考虑到红树是常绿灌木，而互花米草是一种在秋冬季凋谢的多年生草本植物，选择秋冬季节的影像更适合区分两个物种的分布范围(沈鸿坤 等, 2022)

表 1 遥感影像数据信息表

Tab. 1 Information table of remote sensing image data

影像类型	传感器	成像日期	波段数	分辨率/m	备注
LANDSAT_5	TM	1987/12/6	6	30	-
LANDSAT_5	TM	1993/12/6	6	30	-
LANDSAT_5	TM	2002/11/5	6	30	-
LANDSAT_5	TM	2009/1/16	6	30	-
LANDSAT_8	OLI_TIRS	2016/11/3	7	30/15	全色波段 15m
LANDSAT_8	OLI_TIRS	2021/12/3	7	30/15	全色波段 15m

1.2 分类标准和评价方法

在参照《第三次全国国土调查技术规程（最终报批稿）》的基础上，结合多次野外考察，根据研究区的实际土地利用/覆盖类型的特点，最终分为耕地、红树林地、建设用地、林地、沿海滩涂、养殖坑塘，米草滩（即生长互花米草的滩涂）等 7 类。

本研究预处理使用 ENVI5.3 遥感处理软件，过程包括辐射定标、大气校正、裁剪等。解译和评价采用面向对象的遥感图像分类方法。操作平台是 eCognition9.0 软件，根据图层对影像分割结果的适宜性和重要程度调整其在影像分割中的权重，权重取值 0-10 之间，权重越大，图层中的信息用于影像分割就越多(贾明明 等, 2014)；在多尺度分割之后，采用 eCognition 软件监督分类（最近邻分类）进行地类提取。与非监督分类相比，在分类之前，监督分类已明确各类的内容，而且可以通过调整训练集的采样，改善分类效果，此间影像采用 564 假彩色组合更好区分地类（图 2），图中假彩色即用 SWIR1（短波红外 1）、NIR（近红外）Red（红波段）对应 Red、Green、Blue；通过哨兵二号 3m 高分辨率影像进行地类赋值，结合实际调查中的地类验证进行校正得到验证点，精度评

估在 eCognition9.0 软件中进行，2021 年总体精度达到了 90%以上，Kappa 系数为 0.85，符合应用要求，为提高分类结果，研究进一步采用人机交互的目视解译方式，结合高分别率历史影像（Google Earth Pro、Esri ArcGIS）和 2000-2020 年全国土地利用分类图，对面向对象分类结果进行编辑、修改，手动将面向对象分类错分、漏分的对象赋予正确的属性，并在 Arcmap10.8 软件中生成最终的土地利用\覆被分布图（图 3）。

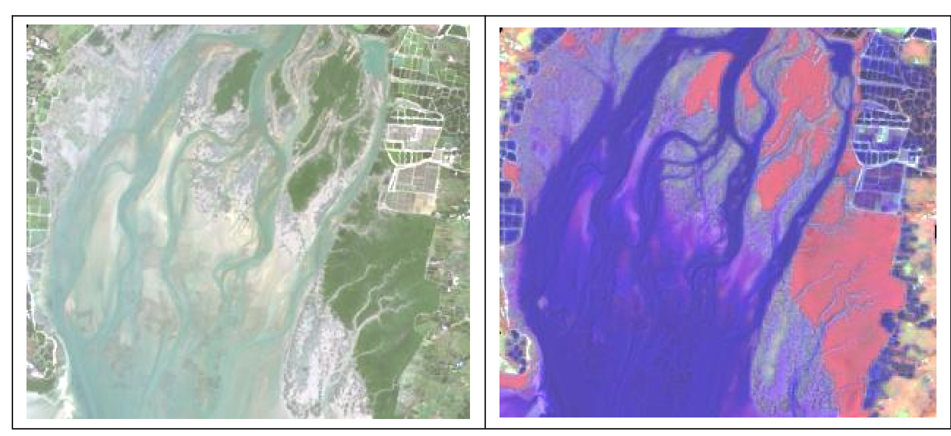


图 2 真彩色示例（左）和假彩色示例（右）

影像为地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)中 Landsat 数据

Fig. 2 True color example (left) and false color example (right)

在众多的景观格局分析方法中，应用最广泛的是景观指数。这种指数有效地整合了景观空间格局数据，并传达了其在结构组成和空间布局方面的特征(李辉 等, 2021)；参照国内外在景观生态上的研究成果及方法，选择与之相关八种景观生态指标：斑块数量（NP）、斑块密度（PD）、景观形状指数（LSI）、周长面积分数维数（PAFRAC）、均匀度指数（SHEI）、分离度指数（SPLIT）、香农多样性指数（SHDI）和蔓延度指数（CONTAG），这些指数的概念、计算方法及生态学意义参见文献(邬建国, 2000;陈文波 等, 2002)，计算过程在 Fragstats4.2 软件中进行，此外，还利用 SPSS 软件进行了 Pearson 相关性分析，以揭示土地类别变化与景观格局之间的关系。

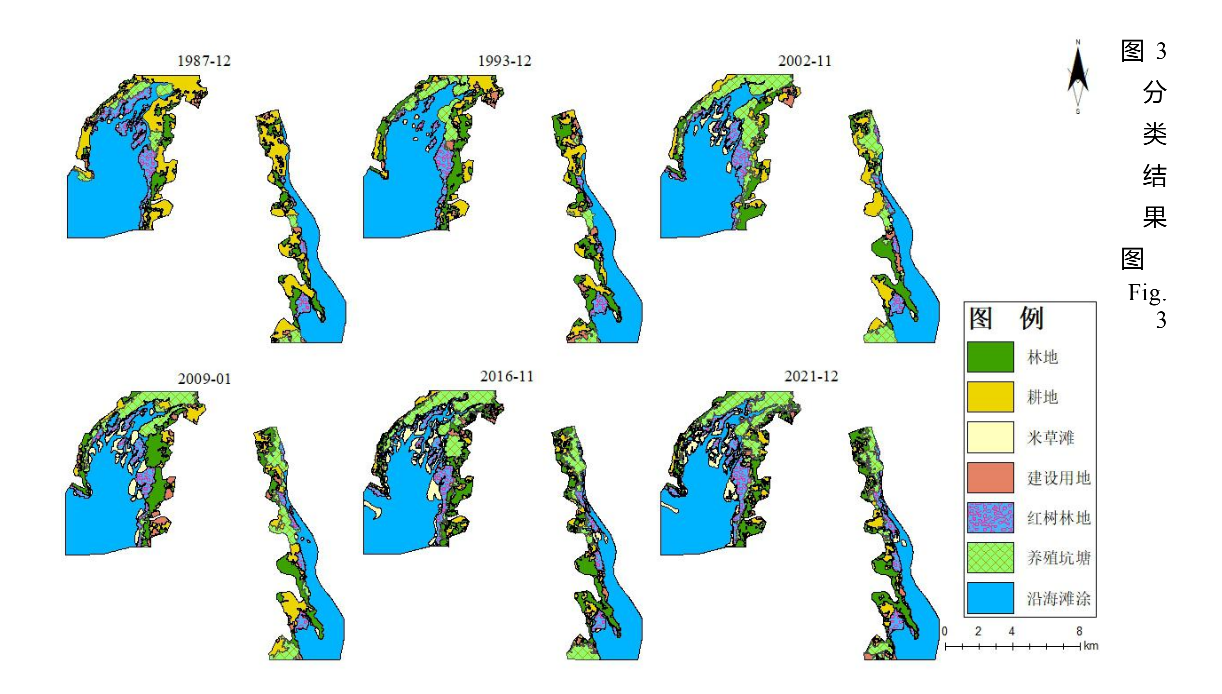


图 3 分类结果图

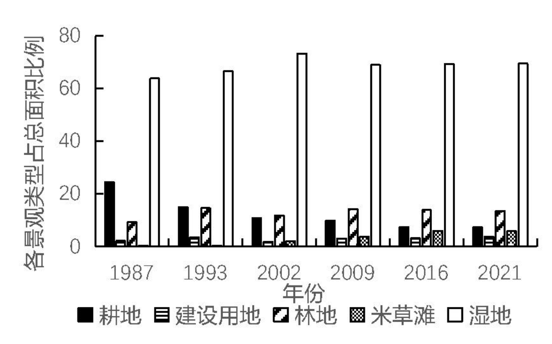
Fig. 3

Classification result chart

2. 结果分析

2.1 土地利用/覆被变化和转换速率

由图 3 可知 ,研究区域覆被类型由湿地、耕地、建设用地、林地和米草滩组成，并在 1987—2021 年期间在地类之间不断转换；研究区域内，湿地占据主要面积，面积变化呈先增后减趋势，耕地面积呈减少趋势，米草滩则呈现跳跃式增长趋势，林地、建设用地变化相对平稳。湿地系统由红树林、沿海滩涂、养殖坑塘三大部分组成，沿海滩涂占据主要面积，其中，养殖坑塘的面积从 1987 年占研究区域总面积的 6.96%上升到 2021 年的 21.13% ,对湿地面积变化起到主导作用。通过土地转移矩阵(表 2)可知：1987—2021 年间，耕地面积共减少 1620.62 hm2，其中，转化成养殖坑塘的面积为 708.05hm2，而养殖坑塘面积增长 932.40 hm2，其主要来自耕地和林地的转化；1993 年以后，米草滩面积从 27.37ha 增长至 2021 年的 470.09 hm2，主要侵占原沿海滩涂的区域（表 2，图 4）。



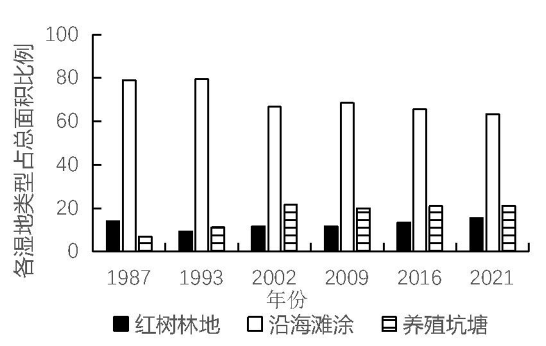


图 4 山口红树林保护区各景观类型面积动态变化图

Fig. 4 Dynamic change of area of each landscape type in Shankou Mangrove Reserve

表 2 山口红树林保护区 1987-2021 年景观转移矩阵

Table 2 Landscape transfer matrix of the Shankou Mangrove Reserve 1987-2021

年份	面积（ha）	1993 年						
		耕地	红树林地	建设用地	林地	米草滩	沿海滩涂	养殖坑塘
1987 年	耕地	1172.76	5.94	105.70	430.67	0.00	13.00	228.56
	红树林地	0.54	421.12	0.00	13.61	0.30	260.32	24.26
	建设用地	3.75	0.20	111.73	33.32	0.00	5.10	22.53
	林地	10.32	16.02	26.04	672.98	0.00	6.20	7.18
	米草滩	0.00	0.00	0.00	0.00	16.21	0.00	0.00
	沿海滩涂	8.68	50.45	9.50	12.03	10.86	3910.60	27.14
	养殖坑塘	0.41	3.51	25.55	5.38	0.00	33.99	286.42

年份	面积（ha）	2002 年						
		耕地	红树林地	建设用地	林地	米草滩	沿海滩涂	养殖坑塘
1993 年	耕地	395.95	10.88	67.41	326.09	1.89	16.16	377.80
	红树林地	5.64	421.30	2.82	10.10	1.28	30.51	25.35
	建设用地	57.55	8.47	54.53	30.41	0.00	8.62	118.72
	林地	395.61	9.87	13.08	578.63	0.14	5.62	164.53
	米草滩	0.00	0.00	0.00	0.00	27.11	0.16	0.00
	沿海滩涂	2.24	223.28	8.21	3.72	134.92	3819.88	38.36

	养殖坑塘	11.93	10.38	0.54	0.70	0.11	31.70	540.45
年份	面积（ha）	2009 年						
		耕地	红树林地	建设用地	林地	米草滩	沿海滩涂	养殖坑塘
2002 年	耕地	373.50	2.03	154.92	209.14	0.00	0.00	129.61
	红树林地	10.88	526.44	0.45	22.44	34.14	61.65	28.21
	建设用地	85.88	4.73	15.49	19.28	0.13	7.86	13.38
	林地	208.45	4.78	68.78	619.90	0.00	1.90	45.99
	米草滩	0.00	0.00	0.00	0.13	164.40	0.94	0.00
	沿海滩涂	8.06	79.43	1.97	15.84	101.79	3653.60	51.98
	养殖坑塘	103.52	20.26	9.39	250.08	0.00	49.68	832.14
年份	面积（ha）	2016 年						
		耕地	红树林地	建设用地	林地	米草滩	沿海滩涂	养殖坑塘
2009 年	耕地	260.03	15.19	98.25	270.08	1.01	12.14	133.48
	红树林地	1.65	515.59	2.62	4.18	28.50	69.20	15.24
	建设用地	105.20	0.46	32.89	94.89	0.00	2.65	14.90
	林地	187.37	24.29	57.97	650.71	2.59	28.93	184.22
	米草滩	0.69	29.52	0.14	0.00	248.72	21.23	0.00
	沿海滩涂	1.67	80.05	1.91	1.32	200.58	3444.77	44.70
	养殖坑塘	40.06	81.11	60.32	89.20	1.49	57.95	770.60
年份	面积（ha）	2021 年						
		耕地	红树林地	建设用地	林地	米草滩	沿海滩涂	养殖坑塘
2016 年	耕地	288.49	6.73	58.83	228.37	0.45	0.23	12.82
	红树林地	0.88	644.78	6.52	6.50	26.16	23.76	37.12
	建设用地	68.27	4.17	83.94	42.90	1.09	2.60	50.27
	林地	207.86	15.02	41.64	766.35	0.21	1.46	76.18
	米草滩	1.23	58.12	0.27	0.56	317.44	103.62	1.36
	沿海滩涂	3.69	109.86	16.23	5.15	119.93	3343.50	37.76
	养殖坑塘	13.75	25.42	88.41	31.38	4.11	41.99	956.96

2.2 景观水平上景观格局变化特征

由图 5 可知，近 35 年间，斑块个数和斑块密度持续增长，其中 2021 年斑块个数（394 个）和斑块密度（4.93）达到最大值；1987—2021 年景观形状指数均呈现先减少后增加再减少的趋势，最大值在 2016 年（14），最小值在 2002 年（10），2021 年相较于 1987 年增加了 34.75%；周长面积分维数和景观形状指数变化趋势相同，但在 2021 年有下降趋势。1984—2014 年研究区的蔓延度指数呈持续少趋势，其最大值出现在 1987 年为 53.69，2021 年最小值（42）；香农多样性指数为逐渐增加状态，其变化过程正好与蔓延度指数相反；分离度指数经历了一个先减少、后增加、最后减少的波动过程，在 2016 年出现最大值 8.55，1992 年出现最小值 5.93；均匀度指数呈增加趋势且值逐渐接近于 1；多样性指持续数增加，2021 年达到最大值。

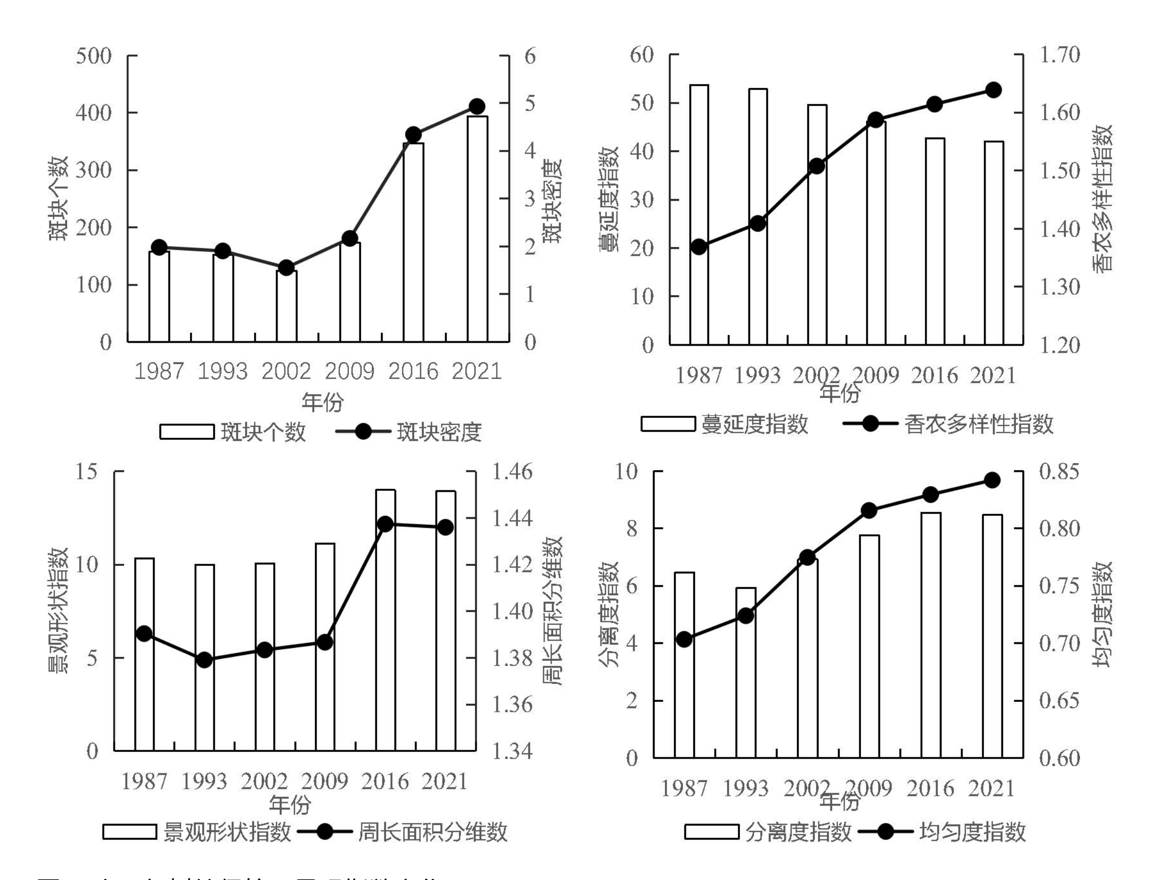


图 5 山口红树林保护区景观指数变化

Fig. 5 Changes in landscape index of the Shankou Mangrove Reserve

2.3 景观类型变化对景观格局指数的响应

地区景观结构的稳定性主要由该地区土地的合理利用决定。不合理的土地使用可能导致生物多样性降低、斑块破碎化和生境退化。使用 SPSS 软件进行了土地利用/覆盖变化与景观指数之间的相关性分析。如表 3 所示，两个主要类别（沿海滩涂和米草滩）的面积变化与所有景观指数显著或高度显著相关。此外，耕地和养殖坑塘与大多数景观指数呈显著相关。。其中，耕地与蔓延度、香农多多样性指数、分离度指数呈显著负相关，养殖坑塘与香农多样性指数呈显著正相关，米草滩与蔓延度呈极显著负相关，与香农多样性、分离度指数呈极显著正相关，与斑块密度、斑块个数呈显著正相关；沿海滩涂正与其相反，呈现出与香农多样性、分离度指数呈极显著负相关，与蔓延度指数呈显著正相关，与斑块密度、斑块个数呈显著负相关。

表 4 山口红树林湿地景观格局指数与景观类型面积变化之间的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between landscape pattern indices of mangrove wetlands in the mountain pass and changes in area of landscape types

景观指数	耕地	红树林地	建设用地	林地	米草滩	沿海滩涂	养殖坑塘
斑块个数	-0.581	0.738	0.638	0.331	0.864*	-0.827*	0.419
斑块密度	-0.581	0.738	0.638	0.331	0.864*	-0.827*	0.419
蔓延度指数	0.861*	-0.659	-0.517	-0.509	-0.997**	0.948**	-0.788
香农多样性指数	-0.914*	0.575	0.460	0.559	0.961**	-0.917*	0.874*
分离度指数	-0.750	0.744	0.397	0.339	0.983**	-0.979**	0.727

注：**.在 0.01 级别（双尾），相关性显著，*.在 0.05 级别（双尾），相关性显著。

3. 讨论

从 LUCC 角度看，1987—2021 近 35 年间，山口红树林保护区土地利用发生了巨大变化，主要为耕地面积持续减少，多数转化为林地和养殖坑塘，这是由于退耕还林政策实施有效和沿海居民生存方式的演化所导致；养殖坑塘面积从 1987 年占研究区域总面积的 6.96%上升到 2021 年的 21.13%，其在湿地面积变化中起主导作用；米草滩呈现飞跃式的面积增长，主要侵占原沿海滩涂，原因是互花米草具有高度耐盐和抗洪能力，生长和传播能力强特点(潘良浩　等, 2016)，加上我国自然地理环境和气候条件有利于其生长(赵燕　等, 2022)，如今，山口红树林保护区已成为互花米草草扩散最广泛的地区(李丽凤　等, 2021)；红树林地和沿海滩涂转换量较大，1993-2002 年间沿海滩涂转为红树林地达到 223.18ha，原因为人们对红树林保护意识的提升和人为耕种扩建等，米草滩于 2009 年后正式对红树林地产生侵占影响，并且其扩散在长势较为稀疏、矮小的红树林地相对容易，而生长茂盛，紧密的成片红树林中难以扩散，因此，与红树林的竞争呈现长周期状况，并容易出现两者反复更迭的情况(关道明　等, 2009)，三者此消彼长的状况导致湿地面积发生显著变化。

从景观生态学角度来看，广西山口红树林保护区的景观破碎化在 1987 年至 2021 年期间持续增加，2021 年达到顶峰。景观形状指数、周边面积分维数与景观破碎化趋势相似，表明人类活动干扰增加，2021 年呈现下降趋势。蔓延度指数指数持续下降，景观呈现多种要素的密集格局表明景观连通性逐渐下降，景观呈现多元素密集分布模式(Turner M G et al., 2001)；香农多样性指数逐渐增加，表明景观丰富度的提高。分离度指数经历了先减少、再增加、最后减少的波动过程，表明景观分布变得更加复杂，不同景观类型之间的更替发生得更加频繁(Jongman E et al., 2001)；均匀度指数呈现上升趋势，表明景观斑块类型分布均匀，没有明显的优势类型(Burel F et al., 1995)。

总的来说，在 1984 年至 2021 年间，研究区的景观异质性呈现上升趋势。各种景观类型的分布开始趋于平衡，湿地作为主导景观类型的突出地位逐渐下降。这一观察结果与周海菊等人对广西北部湾经济区景观格局动态变化的研究结果相一致(周海菊　等, 2022)。就 Pearson 相关性分析而言：土地利用变化与沿海滩涂、米草滩、耕地和养殖坑塘等类型的景观指数之间存在显著关联。入侵物种和人为干扰主要影响了保护区的景观结构。具体而言，米草滩面积的扩张和沿海滩涂面积的减少是局部景观碎片化增加和景观演替频繁的主要原因。相反，米草滩面积的减少和沿海滩涂面积的增加主要有助于提高景观连通性，耕地面积的扩张也产生了一定影响。景观丰富度增加的主要原因是米草滩面积的扩大，而养殖坑塘面积的扩大和沿海滩涂面积的缩小也起到了一定作用。

众多国际研究项目已证实，与广西山口红树林保护区类似的生态系统，常常因受到人类活动的影响而在土地利用和覆被变化以及景观布局方面发生变化。如 WangH 等认为人类活动使土地利用/土地覆被(LULC)发生了显著变化(Wang H et al., 2021) ,(Lee S W et al., 2009)认为人类活动对景观的干扰更加严重，(Guan D et al., 2008)认为土地利用的类型与人类活动的特点密切相关，这与本研究有着相同之处，但除此之外本文研究指出入侵物种的干扰在一定程度上高于人

为干扰，这是由于区域地理状况的影响所致，在未来的研究中，可以进一步深入探讨这些因素对景观结构和生态系统功能的影响，并提出更加有效的管理策略。

4. 结论和思考

1、在研究区间内，湿地占据主要面积，面积变化呈先增后减趋势，耕地面积呈减少趋势，米草滩则呈跳跃式增长趋势，林地、建设用地变化相对平稳。

2、养殖坑塘和米草滩的共同干预对湿地面积变化起到主导作用，而林地的增长主要来自耕地转入得来。

3、沿海滩涂和米草滩的面积变化与所有景观指数存在显著或极显著相关性，耕地和养殖坑塘与大部分景观指数呈显著相关性。

该研究区域土地利用/覆被变化的研究结果显示，区域景观结构受到入侵物种的影响。其中，互花米草作为外来物种，体现了其极强适应性和入侵性。此外，养殖坑塘也是该区域土地利用/覆被变化的一个重要因素，这些变化可能会导致生物多样性的降低、斑块破碎化和生境的退化。因此，未来需要在土地利用上进行合理规划和防治，如行之有效的互花米草清除手段，在保障民生的前提下，退塘还林、还湿等，坚持人与自然和谐共生。

参考文献 References

张韫, 廖宝文, 2022. 我国红树林湿地生态修复技术研究现状分析[J]. 中国科学基金, 第 36 卷(3): 412-419.

ZHANG YUN, LIAO BOWEN, 2022. Analysis of the current status of research on ecological restoration technology of mangrove wetlands in China[J]. China Science Foundation, Vol. 36(3): 412-419 (in Chinese with English abstract).

郑晓敏, 2017. 1985～2015 年中国典型红树林自然保护区遥感监测与分析[D]. 福建农林大学.

ZHENG XIAOMIN, 2017. Remote sensing monitoring and analysis of typical mangrove nature reserves in China from 1985 to 2015[D]. Fujian Agriculture and Forestry University (in Chinese with English abstract).

韩淑梅, 2012. 海南东寨港红树林景观格局动态及其驱动力研究[D]. 北京林业大学.

HAN SHUMEI, 2012. Dynamics of mangrove landscape pattern and its driving force in Dongzhai Harbor, Hainan [D]. Beijing Forestry University (in Chinese with English abstract).

吴庭天, 丁山, 陈宗铸, 2020. 基于 LUCC 和景观格局变化的海南东寨港红树林湿地动态研究[J].林业科学研究, 第 33 卷(5): 154-162.

WU TINGTIAN, DING SHAN, CHEN ZONGZHU, 2020. Study on the dynamics of mangrove wetlands in Dongzhai Harbor, Hainan based on LUCC and landscape pattern changes[J]. Forestry Science Research, Vol. 33(5): 154-162 (in Chinese with English abstract).

张威, 陈正华, 王纪坤, 2015. 广西北部湾海岸带红树林变化的遥感监测[J]. 广西大学学报(自然科学版), 40(06): 1570-1576.

ZHANG WEI, CHEN ZHENGHUA, WANG JIKUN, 2015. Remote sensing monitoring of mangrove forest changes in the coastal zone of Beibu Gulf, Guangxi[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 40(06): 1570-1576 (in Chinese with English abstract).

韦江玲, 王增军, 潘良浩, 2019. 山口红树林湿地沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. 亚热带资源与环境学报, 14(02): 28-33.

WEI JIANGLING, WANG ZENGJUN, PAN LIANGHAO, 2019. Evaluation of heavy metal content and ecological risk of mangrove wetland sediments in Yamaguchi[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 14(02): 28-33 (in Chinese with English abstract).

余辰星, 杨岗, 陆舟, 2014. 迁徙季节水鸟对滨海不同类型湿地的利用——以广西山口红树林自然保护区为例[J]. 海洋与湖沼, 45(03): 513-521.

YU CHENXING, YANG GANG, LU ZHOU, 2014. Utilization of different types of coastal wetlands by waterbirds during the migration season - A case study of Shankou Mangrove Nature Reserve in Guangxi[J]. Marine and Lakes and Marshes, 45(03): 513-521 (in Chinese with English abstract).

韦江玲, 孙仁杰, 刘文爱, 2020. 广西山口红树林湿地鸟类多样性研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 15(01): 1-10.

WEI JIANGLING, SUN RENJIE, LIU WENAI, 2020. Bird diversity in mangrove wetlands of Shankou, Guangxi[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 15(01): 1-10 (in Chinese with English abstract).

李丽凤, 刘文爱, 陶艳成, 2021. 广西山口红树林保护区互花米草扩散动态及其驱动力[J]. 生态学报, 41(17): 6814-6824.

LI LIFENG, LIU WENAI, TAO YANCHENG, 2021. Dispersal dynamics and driving forces of M. intermedia in Shankou Mangrove Reserve, Guangxi[J]. Journal of Ecology, 41(17): 6814-6824 (in Chinese with English abstract).

沈鸿坤, 赵博义, 陈铭洋, 2022. 1995—2019 年广西山口红树林国家级自然保护区互花米草和红树林面积变化[J]. 应用生态学报, 33(02): 397-404.

SHEN HONGKUN, ZHAO BOYI, CHEN MINGYANG, 2022. Changes in the area of mutualistic ricegrass and mangrove forests in Shankou Mangrove National Nature Reserve, Guangxi, 1995-2019[J]. Journal of Applied Ecology, 33(02): 397-404 (in Chinese with English abstract).

贾明明, 2014. 1973～2013 年中国红树林动态变化遥感分析[D]. 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所).

JIA, MINGMING, 2014. Remote sensing analysis of mangrove dynamics in China from 1973 to 2013[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology).

王涛, 张超, 2017. 1998—2014 年阿克苏河流域耕地景观时空变化研究[J]. 西南林业大学学报, 第 37 卷(2): 171-178

WANG TAO, ZHANG CHAO, 2017. Spatial and temporal changes of cropland landscapes in the Aksu River Basin from 1998 to 2014[J]. Journal of Southwest Forestry University, Vol. 37(2): 171-178 (in Chinese with English abstract).

李辉, 张晓媛, 国洪磊, 2021. 基于土地利用的三峡库区近 30 年生态系统服务价值时空变化特征[J]. 水土保持研究, 28(2): 309-318.

LI HUI, ZHANG XIAOYUAN, GUO HONGLEI, 2021. Characteristics of spatial and temporal changes in ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir area in the last 30 years based on land use[J]. Research on Soil and Water Conservation, 28(2): 309-318 (in Chinese with English abstract).

邬建国, 2000. 景观生态学格局、过程、尺度与等级[M]. 北京：高等教育出版社。

WU JINAGUO, 2000. Landscape Ecology Patterns, Processes, Scales and Hierarchies [M]. Beijing: Higher Education Press.

陈文波, 肖笃宁, 李秀珍, 2002. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. 应用生态学报, (1): 121-125.

CHEN WENBO, XIAO DUNING, LI XIUZHEN, 2002. Research on the classification, application and construction of landscape index[J]. Journal of Applied Ecology, (1): 121-125. (in Chinese with English abstract)

潘良浩, 史小芳, 陶艳成, 2016. 广西海岸互花米草分布现状及扩散研究[J]. 湿地科学, 第 14 卷(4): 464-470.

PAN LIANGHAO, SHI XIAOFANG, TAO YANCHENG, 2016. Distribution status and dispersal study of mutualistic ricegrass on the coast of Guangxi[J]. Wetland Science, Vol. 14(4): 464-470 (in Chinese with English abstract).

赵燕, 王森, 杨文清, 2022. 中国互花米草防治措施研究进展及展望[J]. 生物安全学报, 第 31 卷(3): 210-216.

ZHAO YAN, WANG SEN, YANG WENQING, 2022. Progress and Prospect of Research on Control Measures of Miscanthus in China[J]. Journal of Biosafety, Vol. 31(3): 210-216 (in Chinese with English abstract).

李丽凤, 刘文爱, 陶艳成, 2021. 广西山口红树林保护区互花米草扩散动态及其驱动力[J]. 生态学报, 第 41 卷(17): 6814-6824.

LI LI-FENG, LIU WEN-AI, TAO YAN-CHENG, 2021. Dynamics of dispersal and its driving force of mutualistic ricegrass in Shankou Mangrove Reserve, Guangxi[J]. Journal of Ecology, Vol. 41(17): 6814-6824 (in Chinese with English abstract).

关道明, 2009. 中国滨海湿地米草盐沼生态系统与管理[M]. 北京: 海洋出版社

GUAN DAOMING, 2009. Ecosystem and Management of Miscanthus Saltmarshes in Coastal Wetlands of China [M]. Beijing: Ocean Press

周海菊, 刘小英, 胡靓达, 2022. 基于最佳分析粒度的广西北部湾经济区景观格局动态变化分析[J]. 生态与

农村环境学报, 第 38 卷(5): 545-555.

ZHOU HAIJU, LIU XIAOYING, HU LIANGDA, 2022. Dynamic change analysis of landscape pattern in Beibu Gulf Economic Zone of Guangxi based on the optimal analysis granularity[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, Vol. 38(5): 545-555 (in Chinese with English abstract).

CAMERON CLINT, HUTLEY LINDSAY B, FRIESS DANIEL A, 2019. Estimating the full greenhouse gas emissions offset potential and profile between rehabilitating and established mangroves[J]. Science of the Total Environment, Vol.665(1): 419-431.

JUNYAO ZHANG, 2021. Remote Sensing Based Spatial-Temporal Monitoring of the Changes in Coastline Mangrove Forests in China over the Last 40 Years[J]. Remote Sensing, Vol.13(10).

ANH NGOC THI DO, HAU DUC TRAN, MATTHEW ASHLEY, 2022. Anh Tuan Nguyen.Monitoring landscape fragmentation and aboveground biomass estimation in Can Gio Mangrove Biosphere Reserve over the past 20 years[J]. Ecological Informatics, Vol.70: 101743.

PASTOR-GUZMAN, J DASH, JADUNANDAN, 2018. Atkinson, Peter M.Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers[J]. Remote Sensing of Environment, Vol.205: 71-84.

ZHANG YIHAN, LI XIA, LIU XIAOPING, et al, 2015. Self-modifying CA model using dual ensemble Kalman filter for simulating urban land-use changes[J]. International Journal of Geographical Information Science, Vol.29(9): 1612-1631.

A. AZIZI B. MALAKMOHAMADI, H. JAFARI, 2016. Land use and land cover spatiotemporal dynamic pattern and predicting changes using integrated CA-Markov model[J].GLOBAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND MANAGEMENT-GJESM,Vol.2(3): 223-234

TURNER M G, GARDNER R H, O'NEILL R V, 2001. Landscape ecology[J]. Theory and practice. New York: Springer-Verlag.

JONGMAN R.H.G., TER BRAAK C.J.F., VAN TONGEREN O.F.R, 1987. Data analysis in community and landscape ecology.[J].Data analysis in community and landscape ecology.,: 299

BUREL F, BAUDRY J, 2003. Landscape ecology: concepts, methods, and applications[M]. Science Publishers.

WANG H, LIU X, ZHAO C, et al, 2021. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National nature reserve in Gansu Province, China[J]. Ecological Indicators, 124: 107454.

LEE S W, HWANG S J, LEE S B, et al., 2009. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. Landscape and Urban Planning, 92(2): 80-89.

GUAN D, GAO W, WATARI K, et al, 2008. Land use change of Kitakyushu based on landscape ecology and Markov model[J]. Journal of Geographical Sciences, 18: 455-468.